复合材料学报 第21卷 第4期 8月 2004年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 21 No. 4 August 2004

文章编号: 1000-3851(2004)04-0071-06

缝合复合材料可用性——一般层合板的基本性能

程小全*, 郦正能, 寇长河
(北京航空航天大学 飞机设计研究所, 北京 100083)

摘 要: 通过试验研究了缝合T300帘子布/QY9512常用层合板的拉伸和压缩性能, 考察了缝合方向、铺层顺序和环境因素对层合板拉、压性能的影响, 得到了3种常用层合板及其孔板的拉伸、压缩强度与模量。研究结构表明: 缝合与缝合方向对常用层合板的拉伸强度与模量的影响不大; 不同铺层顺序层合板的拉伸强度和模量受缝合与缝合方向的影响程度不同。缝合方向与铺层形式对孔板的缝合效果均有影响, 层合板的最佳缝合方向随铺层形式不同而发生变化。缝合对层合板湿热状态下压缩性能的影响与铺层顺序有很大关系。缝合使含孔层合板的干态常温压缩强度明显提高, 使湿热时的强度明显降低。

关键词: 缝合; 层合板; 拉伸; 压缩
中图分类号: V258+.3 **文献标识码:** A

PROPERTIES OF STITCHED COMPOSITE LAMINATES——THE PRINCIPAL PROPERTIES OF GENERAL LAMINATES

CHENG Xiaoquan*, LI Zhengneng, KOU Changhe
(Aircraft Design and Research Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The experiments were carried out on tensile and compressive properties of the ordinary laminates made of uniweave T300/QY9512. The effects were investigated of stitching directions, layup sequences and environmental factors on tensile and compressive properties. Tensile and compressive strength and modulus were measured for three kinds of un-notched laminates and laminates with a hole. It is shown that stitching and stitching directions have little effect on the strength and modulus of ordinary laminates, and the effects were different on the laminates with different layup sequences. Stitching and layup sequences have influence on stitching effectiveness of laminates with a hole. The best stitching direction is varied with the laminate layup sequence. The effect of stitching on the laminate compressive properties in hygrothermal environment is greatly related to layup sequences. Stitching makes compressive strength of laminates with a hole increase obviously under normal environmental condition, but decrease under hygrothermal environmental condition.

Keywords: stitching; laminates; tension; compression

目前国外对缝合复合材料层合板力学性能的研究以试验分析为主, 理论研究并不太多[1~3], 这主要是由于缝合给层合板力学性能所带来的影响与许多因素有关, 其影响机理还不完全清楚。研究者普遍认为, 缝合使传统层合板在厚度方向成为一个整体, 因而明显提高了层间性能, 但同时缝合也对层合板的面内力学性能有很大影响[3]。影响缝合层合板面内力学性能的因素很多, 包括层合板的类型(预浸料或预成型体)、层合工艺(预浸料铺层或液体模塑)、缝合条件(缝合密度、缝线类型、缝线直径、缝线的张力和缝合方向)以及加载条件等, 目前还很难确定缝合到底是提高、降低或是不影响层合板的面内力学性能[3~5]。部分研究认为, 缝合可以提高面内某些性能。但多数研究认为缝合会引起纤维弯曲和损伤, 因而降低了层合板的面内性能, 尤其是由预浸料工艺制成的缝合层合板表现得更为明显, RTM、RFI工艺制成的缝合层合板的纤维损伤较少, 因而具有较好的面内力学性能。缝合导致层合

收稿日期: 2003-06-18; 收修改稿日期: 2003-09-01
基金项目: 凡舟基金资助项目(20020509)
通讯作者: 程小全, 博士, 副教授, 现主要从事复合材料损伤力学、复合材料结构设计等方面的研究 E-mail: xzh67113@sohu.com

板的损伤形式有纤维断裂、富胶区、纤维扭折和非准直排列等，其中纤维扭折和非准直排列被认为对板的拉、压性能影响最大。由此可见，由于缝合复合材料结构的复杂性，对于不同的材料和工艺应该进行必要的试验研究，以分析缝合复合材料层合板的重要影响因素及其作用规律。

国内在缝合复合材料层合板的面内刚度与强度、低速冲击损伤，以及层间剪切强度与断裂韧性等力学性能方面进行了理论分析与试验研究[4～7]，并取得了相应的成果。以前的研究主要集中在QY 8911 树脂体系基体以及预浸带固化（湿法缝合)、RFI 工艺（干法缝合）制造的层合板上，而且这些研究并不全面系统。为此，在原有研究经验基础上，本文作者对单向层合板、正交对称层合板和常用对称层合板的拉伸、压缩、疲劳、冲击后压缩等力学性能进行系统的试验研究，以考察缝合密度、缝合方向、湿/热环境的影响。所选用的纤维是目前国内航空产品上应用最多的T 300 帘子布，基体为国内开发的RFI 专用树脂QY 9512。这项研究一方面可以对国内的缝合/RFI 工艺生产复合材料的力学性能有一个全面的认识，另一方面可以积累国内材料的性能数据，为最终数据库的建立奠定基础。

本文作者是继文献[8]有关单向层合板和正交对称层合板的性能分析与讨论之后，对工程中常用层合板缝合后的拉伸和压缩性能进行试验研究。

1　试　验

1.1　试件

试件所用材料均为T 300 帘子布/QY9512，采用链式缝合技术，RFI 工艺成型。缝合线为Kevlar 29，其中面线为1400 旦尼尔（Denier)，底线为400 旦尼尔。如果没有特殊说明，试件的缝合密度为行距5 mm，针距3 mm。缝合方向有3 种，它们是0 缝合、45 缝合和90 缝合。为了研究缝合效果，每种试验均有相应的无缝合试件与之对比。试件采用了3 种常用的铺层形式：A 板为 $[45/0/-45/90]_{4S}$，B 板为 $[0/45/0/-45/90/-45/0/45/0]_{2S}$，C 板 $[90/45/90/-45/0/-45/90/45/90]_{2S}$。试件的铺层顺序、缝合方向、试验类型以及试件数量列于表1 与表2。表中的 e_s 表示的是试件的拉伸强度均值 e_t 或压缩强度均值 e_c，E_X 是试件受载方向的工程弹性模量均值。所有试件均为长方形，孔板试件的尺寸如表2 所示，光滑拉伸试件的尺寸（长×宽）为230 mm×25 mm，两端玻璃钢加强片长度均为50 mm；光滑压缩试件的尺寸为45 mm×40 mm，无加强片。

表1　常用层合板光滑试件及其强度与模量

Table 1　Specimens of the un-notched ordinary laminates and their strength and modulus

试件号	铺层顺序	缝向	试验类型	试件数量	e_s/MPa	E_X/GPa
BHS-8	A	无缝合	拉伸	5	524.0	47.3
		0°		5	458.7	46.7
		45°		5	411.9	46.2
		90°		5	458.1	46.1
BHS-9	B	无缝合	拉伸	4	650.3	69.6
		0°		5	600.0	58.5
		45°		5	609.6	65.7
		90°		5	606.6	65.3
BHS-10	C	无缝合	拉伸	5	337.5	34.0
		0°		5	309.7	32.5
		45°		5	295.5	33.5
		90°		5	305.8	32.8
BHS-11	A	无缝合	压缩	10		
		0°		11		
		45°		10		
		90°		12		
BHS-12	B	无缝合	压缩	10		
		0°		10		
		45°		11		
		90°		11		
BHS-13	C	无缝合	压缩	10		
		0°		10		
		45°		10		
		90°		10		

1.2　试验设备及环境

所有的拉伸和压缩试验均在MTS880-50 kN 和MTS880-500 kN 材料试验机上进行，其载荷、位移和应变测试误差均小于1%。试验环境由湿、热两种因素组成，分为干态常温、干态高温、湿态常温、湿态高温等4 种情况。干态是指常态；湿态是指试件在(71±10)℃的蒸馏水中浸泡7 d。浸泡后测得无缝合试件吸湿量约为1%～1.1%。缝合试件吸湿量约为1.1%～1.2%。常温是指（23±3)℃，相对湿度为(50±10)%；高温是指试件在温度为(150±3)℃环境下保温至少5 min。

2　试验结果与分析

2.1　缝合对光滑层合板拉伸性能的影响

图1 和图2 分别给出了无缝合、0°、45°、90 缝合A 板的拉伸破坏形式，B 板和C 板的破坏形式与A 板相同。从图1 和图2 可以看出，在拉伸载荷作用下，缝合层合板与无缝合层合板的破坏形式基本相

表 2　常用层合板含孔试件及其强度

Table 2　Specimens of the ordinary laminates with a hole and their strength

试件号	铺层顺序	缝向	试验类型	试件数量	试件尺寸(长×宽×孔径)/mm×mm×mm	e_s/MPa
BHS-14	A	无缝合	拉伸	5	270×50×12.5	227.7
		0°		5		247.5
		45°		5		242.1
		90°		5		208.9
BHS-15	A	无缝合	拉伸	4	270×38×6.0	285.3
		0°		5		294.2
		45°		5		298.0
BHS-16	B	无缝合	拉伸	5	270×38×6.0	349.0
		0°		5		349.6
		45°		5		386.0
BHS-17	A	无缝合	压缩	10	75×50×12.5	
		0°		6		
		45°		12		
		90°		10		

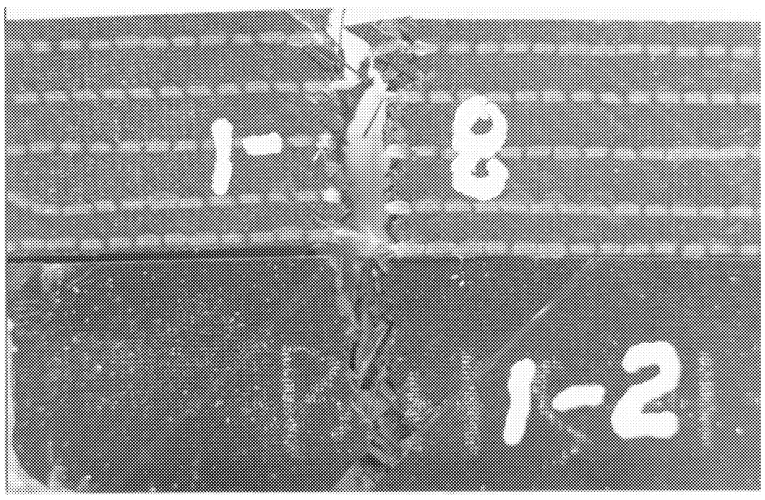

图 1　无缝合与 0 缝合 A 板的拉伸破坏形式

Fig. 1　Tensile failure of Plate A with 0° stitching and unstitching

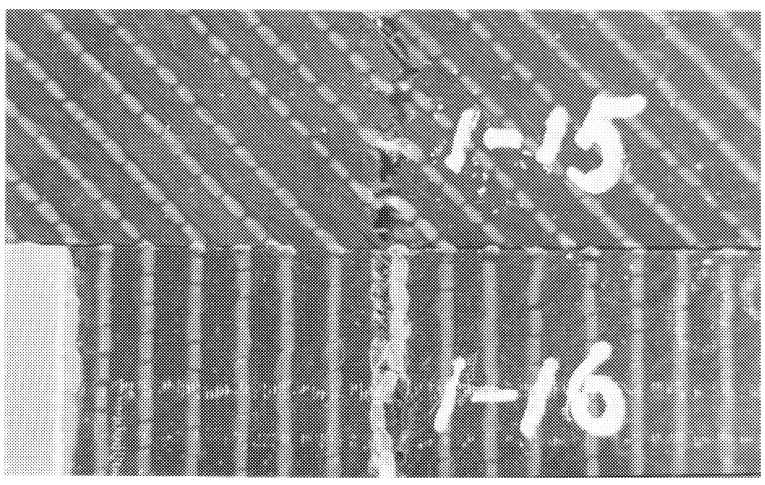

图 2　45°、90 缝合 A 板的拉伸破坏形式

Fig. 2　Tensile failure of Plate A stitched in 45° and 90° directions

同, 只是缝合板均在针脚处断裂, 断口比无缝合板整齐, 断口附近的分层面积非常小。这一特征在图 2 所示的 90 缝合层合板中最为明显。缝合以及缝合方向对层合板的拉伸破坏形式的影响非常小。

图 3 给出了缝合方向对 A、B、C 这 3 种层合板拉伸强度与模量的影响, 它们具体的强度和模量值见表 1。缝合导致了所有 3 种层合板拉伸强度的下降, 最大下降幅度高达21%, 最小为6%, 其中以45 缝合A 层合板情况最为严重。在这3 种层合板中, 缝合对B 板的强度影响最小, 对A 板的影响最大。B 板中 0 铺层占44.4%, 比例较大, 这些铺层对层合板的拉伸强度起控制作用, 因此 B 板的拉伸强度直接取决于缝合对0 铺层拉伸强度的影响; 同样, A 板中±45 铺层占50%, 该板的拉伸强度直接取决于缝合对 45 铺层拉伸强度的影响。文献 [8] 的研究表明, 缝合对0 单向层合板的拉伸强度影响最小, 对45 单向层合板的拉伸强度影响最大。可见, 缝合对常用层合板拉伸强度的影响与对单向层合板拉伸强度的影响相符。图3(a)还显示, 层合板的拉伸强度对缝合方向的改变不敏感。缝合及其方向使层合板的模量略微下降, 因此, 可以认为缝合与缝合方向对常用层合板的弹性模量没有影响。

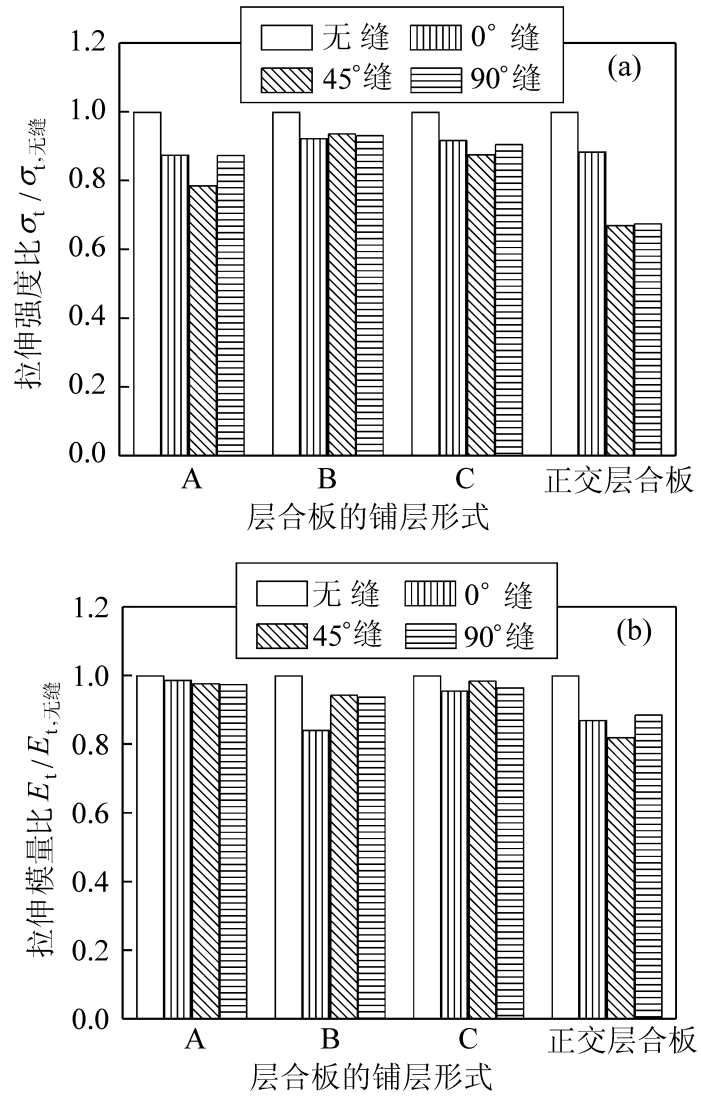

图 3　缝合方向对 3 种层合板拉伸强度与模量的影响

Fig. 3　Effect of stitching directions on tensile strength and modulus of three kinds of laminate

与文献 [8] 中的正交对称层合板相比, 常用层合板的拉伸强度以及模量受缝合以及缝合方向的影

响小很多（见图3），可见常用层合板的拉伸强度与模量对缝合以及缝合方向的敏感度较正交对称层合板要低。与T300帘子布/QY8911-I缝合层合板相比[5]，T300帘子布/QY9512缝合层合板的拉伸强度与模量均比前者高，但是缝合方向对这两种材料层合板的强度与模量影响规律基本一致。

综上所述，缝合与缝合方向对常用层合板的拉伸强度与模量的影响不大；层合板的铺层顺序不同，其拉伸强度和模量受缝合与缝合方向的影响程度会不一样，但是差别并不大。正交对称层合板受缝合的影响程度比常用层合板严重。

2.2　缝合对含孔层合板拉伸性能的影响

图4和图5分别给出了含孔无缝合层合板和45°缝合层合板的拉伸破坏形式。可见，无缝合板与缝合板的破坏形式基本相同，都是在孔边沿垂直载荷方向发生断裂，但是缝合层合板的断口非常平齐，几乎是一条线；而无缝合板在断口附近有较大面积的层间分层，并且孔径越大分层面积也越大。说明缝合改变了拉伸破坏的损伤形式，因此有可能改变含孔层合板的拉伸破坏机理。

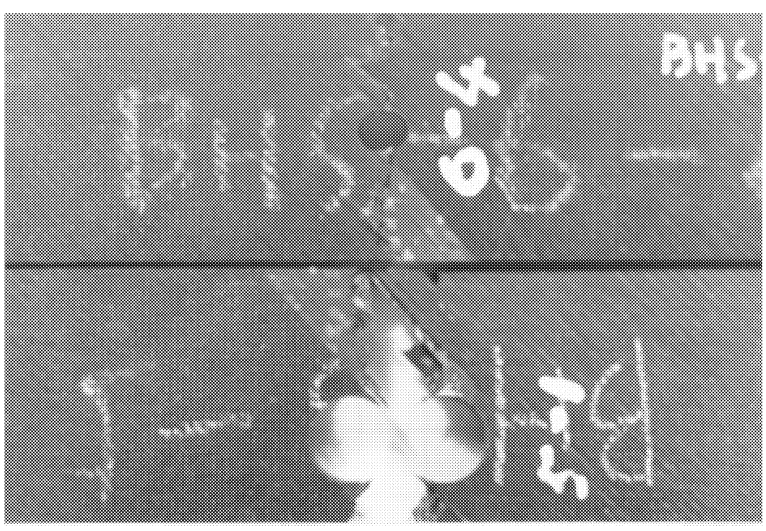

图4　无缝合A板的拉伸破坏形式（大、小孔）

Fig. 4　Tensile failure of unstitched Plate A with a big and small hole

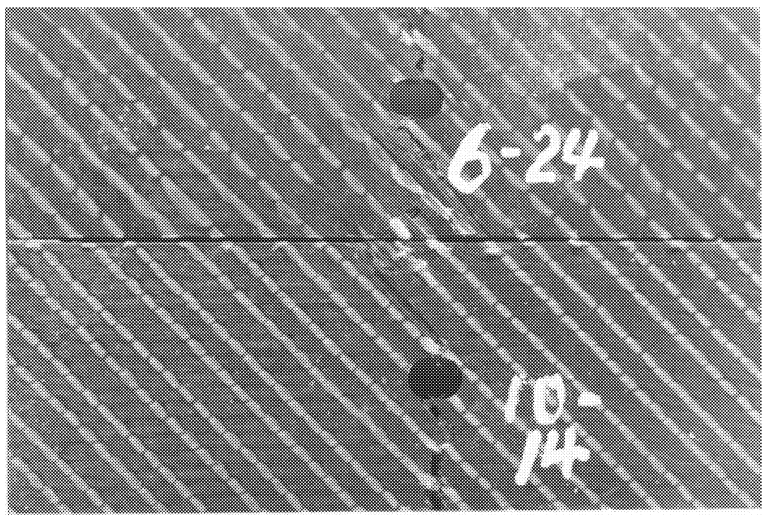

图5　45缝合A板和B板的拉伸破坏形式（小孔）

Fig. 5　Tensile failure of Plate A and Plate B stitched in 45° with a small hole

缝合复合材料孔板的拉伸强度列于表1，图6给出了缝合方向对含孔层合板拉伸强度的影响。图6结果显示，90缝合使含孔层合板的拉伸强度降低，0和45缝合均使层合板的拉伸强度升高。其原因可能是90缝合使层合板孔边缘的面内损伤加剧，而0和45缝合使面内整体性增强，导致层合板孔边处的±45铺层参与面内承载。缝合方向对A板拉伸强度的影响不大，对B板的影响较大，说明缝合方向与铺层形式对孔板的缝合效果均有影响，因此，层合板的最佳缝合方向随铺层形式不同而发生变化。

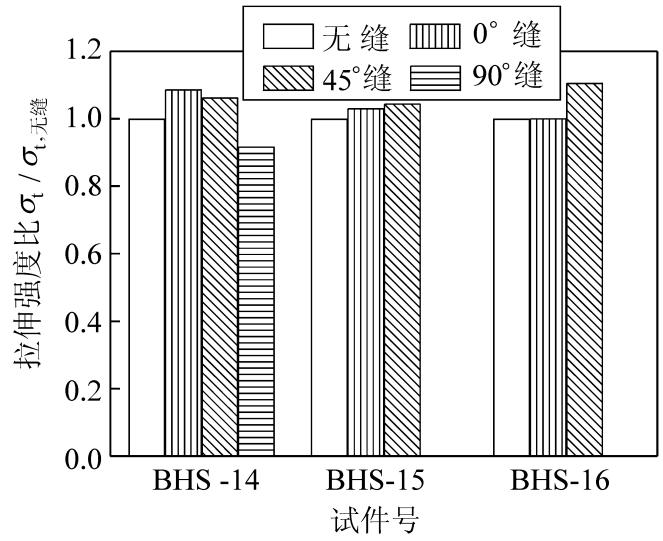

图6　缝合方向对含孔层合板A与B拉伸强度的影响

Fig. 6　Effect of stitching directions on tensile strength of Plate A and Plate B with a hole

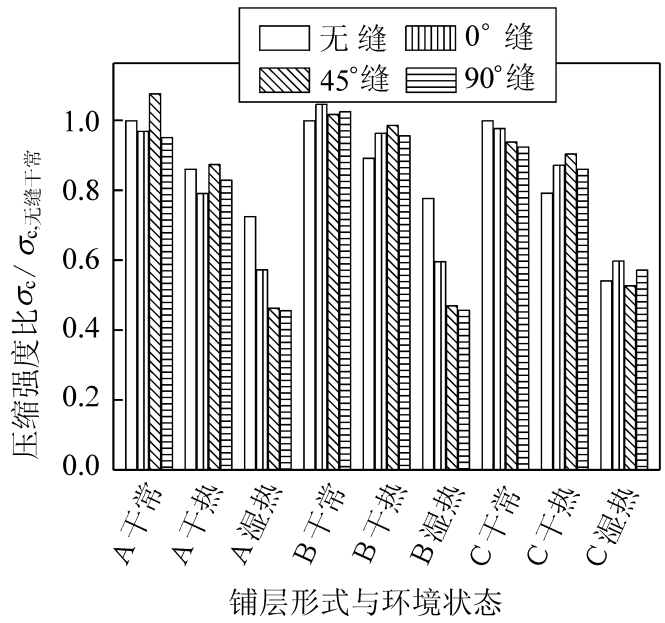

图7　缝合方向对3种层合板压缩性能的影响

Fig. 7　Effect of stitching directions on compressive strength of 3 kinds of laminate

3.3　缝合对光滑层合板压缩性能的影响

图7给出了缝合方向对3种常用层合板压缩性能的影响结果。其中A、B两种层合板的试验结果和它们的压缩破坏特性参见文献[9]。文献[9]对这两种层合板的对比分析发现，无缝合层合板在干态常温、干态高温以及湿热状态下的压缩破坏形式均

以分层屈曲破坏为主，分层破坏区域较大，强度式破坏并不明显。而缝合试件多呈现强度式破坏，破坏断口损伤面积较小，表面缝线有明显的断裂，表面铺层沿针脚有明显的断裂痕迹，并且沿厚度方向呈楔形。干态常温情况下缝合层合板的压缩破坏载荷较无缝合层合板无明显变化；无论是缝合还是无缝合层合板，干态高温及湿热状态下的破坏载荷都会降低，其中干态高温时的降低幅度约为 15%，湿热状态时的降低幅度在 30% ～60% 之间，特别是缝合层合板，其湿热状态下的压缩破坏载荷降低程度较无缝合层合板明显。缝合方向对压缩破坏载荷的影响并不明显。

C 板的破坏形式与A、B 两种板相同。从图 7 可以看出，3 种层合板，无论是缝合还是无缝合，按干态常温、干态高温、湿热状态的顺序，压缩性能不断递减，铺层顺序对层合板的湿/ 热压缩性能有较大的影响。干态高温下层合板的压缩性能下降并不显著，这时缝合起着积极作用，提高了层合板的压缩强度。缝合对层合板的湿热压缩性能有明显的影响；缝合方向对层合板湿热压缩性能的影响也比较大，其中以0 缝合效果最好。铺层顺序不同，层合板的压缩性能对缝合和缝合方向的反应也不同，其中不同层合板的湿热性能对缝合及其方向的敏感度差别很大，缝合后C 板的湿热性能略有提高，而A 板和B 板的性能均有明显的下降。可见，缝合对层合板湿热状态下压缩性能的影响与铺层顺序有很大关系，不能简单地认为缝合使层合板的湿热性能降低[9]。值得注意的是，C 板无缝合时的湿热压缩强度较低，缝合后板的压缩强度提高幅度并不是很大。

一般认为，湿热环境使缝线界面的性能减弱，导致了层合板湿热性能的下降。本文作者认为这仅是其中的一个因素，而湿热环境使缝合层合板面内损伤加剧，可能是引起层合板湿热性能下降的主要原因。湿/ 热条件下，层合板与缝线湿/ 热膨胀系数不匹配，使缝线中的张力增加，导致了缝合层合板面内损伤的加剧。就湿态与温度两个因素来讲，哪个因素引起的缝线张力增加更大，则此因素导致缝合对层合板性能的影响也更大。

3.4 缝合对含孔层合板压缩性能的影响

文献 [9] 的研究发现，含孔层合板受压时，无缝合板主要是分层屈曲破坏，分层面积较大；缝合板以强度破坏为主，且针脚分布在断口上。干态常温下缝合孔板的压缩强度较无缝合板明显提高，湿热状态下，有、无缝合孔板的压缩强度较干态常温状态的有明显降低，无缝合板的降低幅度约为25%，缝合板的为 40% ～50% 。湿热状态下缝合孔板的压缩强度与无缝合板相当。

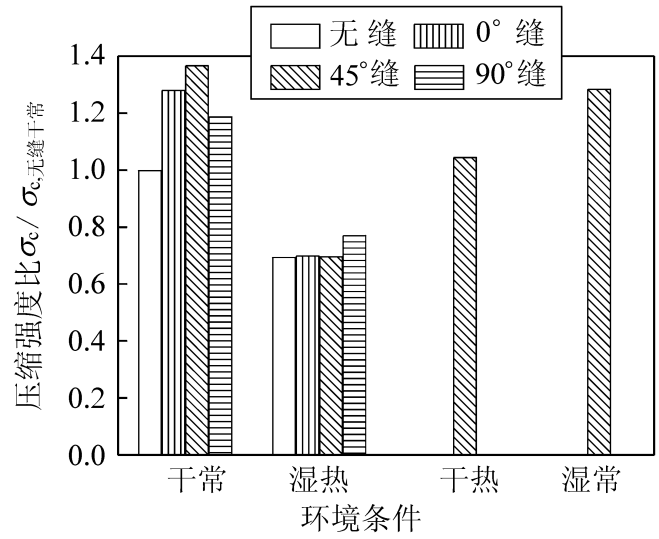

图 8 缝合方向对含孔 A 板压缩强度的影响

Fig. 8 Effect of stitching directions on compressive strength of Plate A with a hole

图 8 中的结果显示，缝合方向对干态常温下孔板的压缩强度有影响，但不大；其对湿热状态下孔板的压缩强度几乎没有影响。高温使缝合对含孔层合板压缩强度的下降比湿态更严重。虽然缝合对含孔A 板湿热状态下的压缩强度没有增强效果，但不能就此认为缝合对含孔层合板的湿热压缩性能没有好处，有可能对于其它铺层形式的层合板，缝合能够提高其湿热性能。

3 结 论

本文作者对 T300 帘子布/ QY9512 制成的 3 种常用层合板进行了光板与孔板静态拉伸和压缩试验研究，考察了缝合方向、铺层顺序以及环境因素对缝合层合板拉、压性能的影响。经过对比分析，可以得出以下结论:

(1) 缝合与缝合方向对常用层合板的拉伸强度与模量的影响不大；不同铺层顺序层合板的拉伸强度和模量受缝合与缝合方向的影响程度不同，但差别不大。正交对称层合板受缝合的影响程度比常用层合板严重。

(2) 缝合改变了含孔层合板拉伸破坏的损伤形式，因而有可能改变孔板的拉伸破坏机理；缝合方向与铺层形式对孔板的缝合效果均有影响，层合板的最佳缝合方向随铺层形式不同而发生变化。

(3) 铺层顺序不同，层合板的压缩性能对缝合和缝合方向的反应也不同。缝合对层合板湿热状态

下压缩性能的影响与铺层顺序有很大关系，不能简单地认为缝合使层合板的湿热性能降低；湿/热条件下，层合板与缝线湿/热膨胀系数不匹配，使缝线中的张力增加，导致缝合层合板面内损伤的增加可能是引起层合板湿/热性能下降的主要原因。

(4) 缝合使含孔层合板的干态常温压缩强度明显提高，对湿热时的强度基本没有影响；缝合方向对干态常温下孔板的压缩强度有较小的影响，对湿热状态下孔板的压缩强度几乎没有影响。

参考文献:

[1] Mattheij P, Gliesche K, Feltin D. 3D reinforced stitched carbon/epoxy laminates made by tailored fibre placement [J]. Composites Part A, 2000, 31: 571- 581.

[2] Mouritz A P, Cox B N. A Mechanistic approach to the properties of stitched laminates [J]. Composites Part A, 2000, 31: 1- 27.

[3] Mouritz A P, Leong K H, Herszberg I. A review of the effect of stitches on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites[J]. Composites Part A, 1997, 28A: 979- 991.

[4] 程小全. 复合材料层合板与蜂窝夹芯板低速冲击后压缩性能研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998. 12- 83.

[5] 桂良进. 缝合层合板基本力学性能和抗冲击性能研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000. 11- 70.

[6] 桂良进, 郦正能, 章怡宁, 等. 缝纫复合材料层合板刚度研究 (Ⅰ): 缝纫单层板有效弹性常数分析[J], 复合材料学报, 2002, 19(1): 95- 100.

[7] 桂良进, 郦正能, 章怡宁, 等. 缝纫复合材料层合板刚度研究 (Ⅱ): 缝纫层合板刚度分析与试验 [J], 复合材料学报, 2002, 19(1): 101- 106.

[8] 程小全, 寇长河, 张怡宁. 缝合复合材料可用性研究: 简单层合板的基本性能 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(11): 1001- 1005.

[9] 陈　刚, 郦正能, 寇长河. 湿热环境对缝合层合板及含孔板压缩性能的影响 [J]. 强度与环境, 2004, 31(1): 46- 49.

(上接第 70 页)

(二). 文体风格

1. 文摘叙述要完整，清楚，简明;

2. 尽量用短句子并避免句形单调;

3. 用过去时态叙述作者工作，用现在时态叙述作者结论;

如 "The structure of dislocation cores in GaP <u>was</u> investigated by weak-beam electron microscopy. The dislocations <u>are</u> dissociated into two Shokley partials with separations of 80±10 and 40±10 A in the pure edge and screw cases respectively. The results <u>show</u> that…"

4. 能用名词做定语不要用动名词做定语，能用形容词做定语就不要用名词做定语。

例如: 用 measurement accuracy　　不用 measuring accuracy

用 experimental results　　不用 experiment results

可直接用名词或名词短语作定语的情况下，要少用 of 句型。

例如: 用 measurement accuracy　　不用 accuracy of measurement

用 camera curtain shutter　　不用 curtain shutter of camera

用 equipment structure　　不用 structure of equipment

5. 可用动词的情况尽量避免用动词的名词形式;

例如: 用 Thickness of plastic sheets was measured.

不用 Measurement of thickness of plastic sheet was made.

6. 注意冠词用法，不要误用、滥用或随便省略冠词。

7. 避免使用一长串形容词或名词来修饰名词，可以将这些词分成几个前置短语，用连字符连接名词组，作为单位形容词 (一个形容词)。

如应用 The chlorine-containing propylene-based polymer of high meld index.

代替 The chlorine containing high melt index propylene based polymer.

8. 尽量用主动语态代替被动语态; (?)

9. 尽量用简短、词义清楚并为人熟知的词;

10. 慎用行话和俗语;

(下转第 91 页)